

# PWM制御形インバータ設計技術の修得

第三技術室システム制御技術班

本堂 義記

## まえがき

近年、インバータ（Inverter）はパワーエレクトロニクスの著しい進歩により産業機器や一般家庭におけるエアコン、照明器具など広範囲の分野において利用されている。また、派遣先研究室においても数年前より交流モータ制御に関する種々の研究が行なわれるようになり、その研究実験用にインバータ装置が用いられている。

これらのことより、インバータ装置の回路および動作原理を理解することは、その装置の改良・保守などに役立つ基本技術を修得するために重要である。したがって、今回は文献などを利用してインバータ装置の基本構成回路とその各部動作原理について理解する。さらに、派遣先研究室などで用いられるモータ制御用のPWM（Pulse Width Modulation）制御形インバータ装置の基本動作を修得し、装置の全体構成回路におけるパワー回路と異常検出回路部分についての基本設計および試作を行ない、各試作回路の動作を確認する。

## インバータの基本と応用

パワーエレクトロニクスの応用分野に、一般に良く知られている交流を直流に順変換する整流（コンバータ）がある。それに対しインバータは直流を交流に逆変換するものであり、その動作原理を図1. に示す。図1（a）の

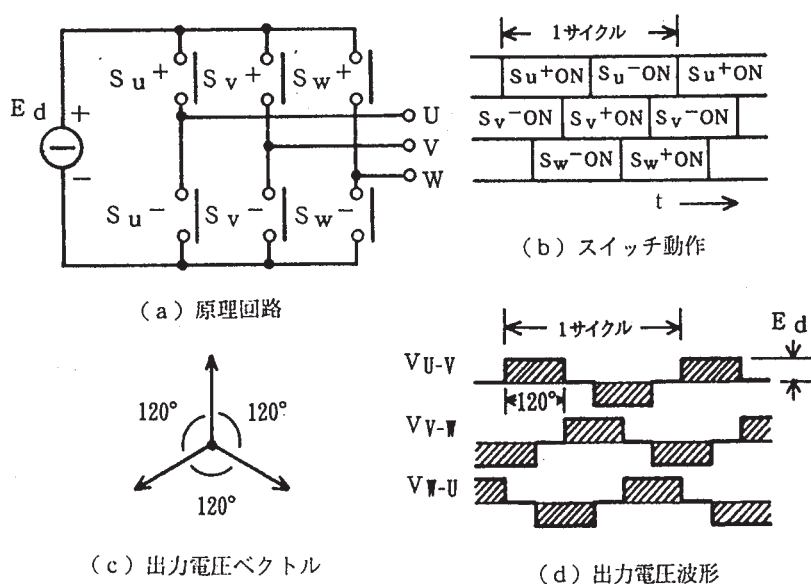
原理回路におけるスイッチを図1

（b）で示すように、

1）一相分のスイッチは上下同時にONしない。

2）一相分のスイッチは上下交互にONし、他相とは $120^\circ$ の位相角を持つ。

この条件により回路を動作させると、図1（d）に示す出力電圧が得られる。原理回路における実際のスイッチには半導体電力素子が用いられ、得られた電圧の波高



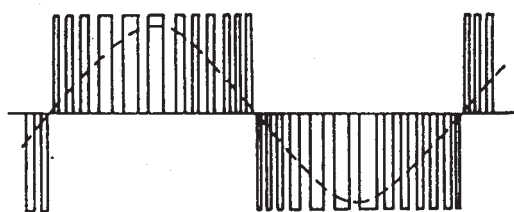
(図) 1. インバータの動作原理

値は直流回路電圧値  $E_d$  となり、その時の周波数はスイッチの開閉数で決定される。  
 インバータは一般電源用やモータ制御用などに用いられ、一般電源用の例に、C V C F (Constant Voltage Constant Frequency) 電源があり、無停電電源や非常用電源などに用いられる。また、モータ制御用の例に V V V F (Variable Voltage Variable Frequency) インバータ駆動方式、すなわち制御入力に応じて自由に電圧と周波数を変化させる可変周波数駆動方式があり、エレベータやエアコンなどに用いられる。

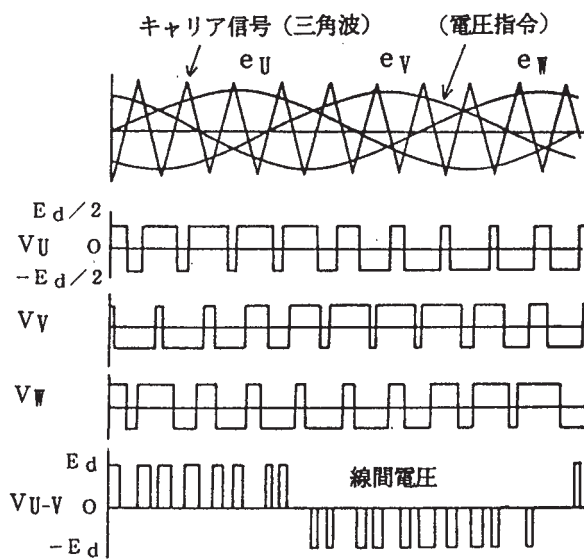
## PWM制御の基本

半導体電力スイッチを用い効率よく電力制御する方法にスイッチのON・OFF時間を制御し、平均電力を調整する時間比率制御があり、この制御法にPWM制御方式(パルス幅変調)、PFM制御方式(パルス周波数変調)、電流ヒステリシス制御方式がある。図2. で示す高周波パルスがPWM制御方式によるインバータの出力波形で、時間軸を微小時間の区間に等分し、各区間において交流波形と同じ大きさのパルスを得る方式である。すなわち、高周波パルスを正弦波状になるようにし、例えば負荷となるモータの回転がスムーズに行なえるように磁束を変化させる方式である。この高周波パルスは、図3. で示す電圧指令  $e$  と一定周波数の搬送波(キャリア周波数)をコンパレータなどを用いて比較し、電圧指令が高い場合は図1. で示す原理回路における上側のスイッチをONさせ、低い場合は下側のスイッチをONさせる。これにより、正弦波状の各相電圧が得られ、線間電圧は相電圧の差電圧となる。また、電圧指令には出力電圧と出力周波数の情報が含まれ、キャリア周波数とともに制御回路で作られ、この制御回路は電子回路やコンピュータのソフトウェアによる波形処理演算などで作られる。

PWM制御によるインバータの最大出力電圧を得るには基本波に基本波の3倍周波数で、大きさ  $1/6$  の電圧を加えればよいことが文献などで示されている。



(図) 2. PWM制御出力波形



(図) 3. PWM制御法

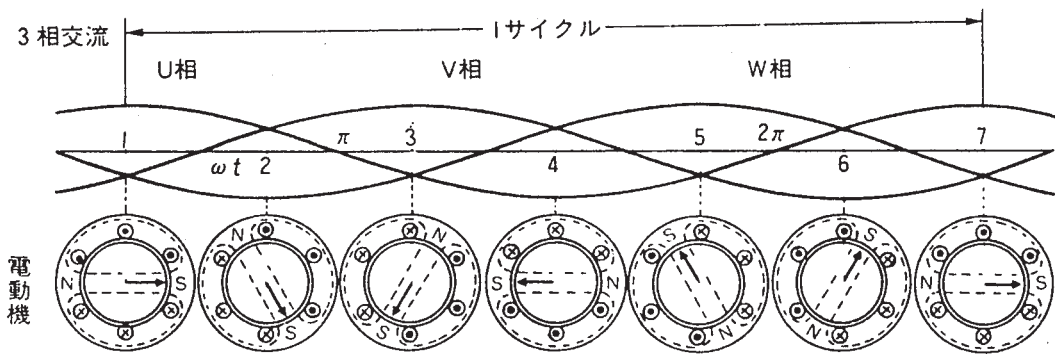
## 駆動交流モータの制御

一般に用いられる交流モータは商用周波数で駆動されるため、その速度制御は難しいが、インバータを導入することにより速度制御が簡単に可能となり、省エネルギーの対策にもなる。交流モータの基本となる誘導電動機の原理は、図4. に示す固定子巻線(⊗●)に三相交流電圧を印加

すると回転磁界が発生し、回転子がこの磁束を切ることにより渦電流が回転子内に生じ、その結果、直流モータと同様にフレミングの左手の法則によりトルクを発生するものである。その時の回転速度Nは(1)式で与えられる。

$$N = \frac{120f}{p} (1 - s) \quad [\text{rpm}] \quad \dots (1)$$

$f$  : 一次周波数 (Hz)  
 $p$  : 電動機極数       $s$  : すべり

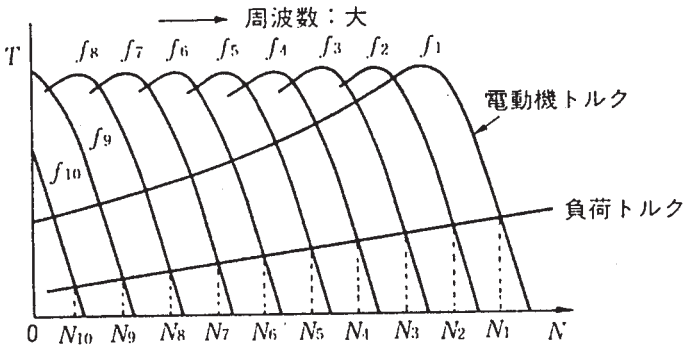


(図) 4. 誘導電動機の回転原理

(1) 式より、モータの回転速度を変化するには  $f$ 、 $p$ 、 $s$  を変えればよい、その方法に、 $f$  の場合は周波数制御法、 $p$  の場合は極数変換法、 $s$  の場合は一次電圧制御法などがあり、周波数制御法についてはインバータを導入することにより図5. に示すように簡単に行なえる。ただし、モータ内の磁束 $\Phi$ は一般に(2)式で取り扱われるため、 $f$  を制御する場合は $\Phi$  が飽和しないように、 $E$  を制御する必要がある。すなわち  $E$  と  $f$  を同時に制御する事が必要であり、これを一般に V V V F 制御方式と呼び、この方式を使った制御に P W M 制御形インバータがある。

インバータ装置の全体構成

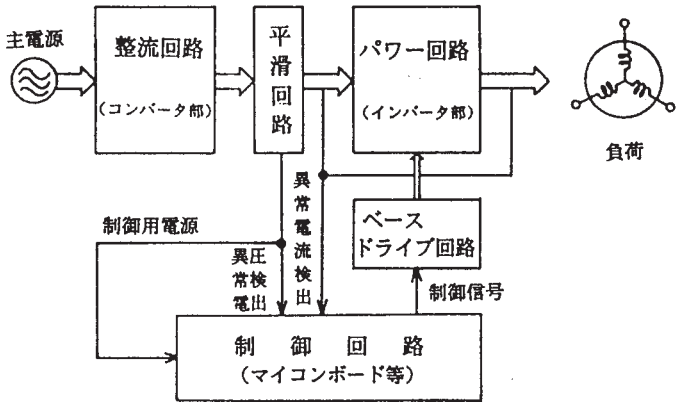
一般に用いられるインバータ装置の基本構成は図6. で示す電源回路、(制御回路と平滑回路) パワー回路、異常検出回路、制御回路で構成され、これら構成回路全体を一般にはインバータと呼んでいる。ここで、電源回路はパワー回路と異常検出回路



(図) 5. 一次周波数制御による速度制御

$$\Phi = K \frac{E}{f} \quad [T] \quad \dots (2)$$

$E$  : モータ誘起起電力 (v)  
 $k$  : 比例定数

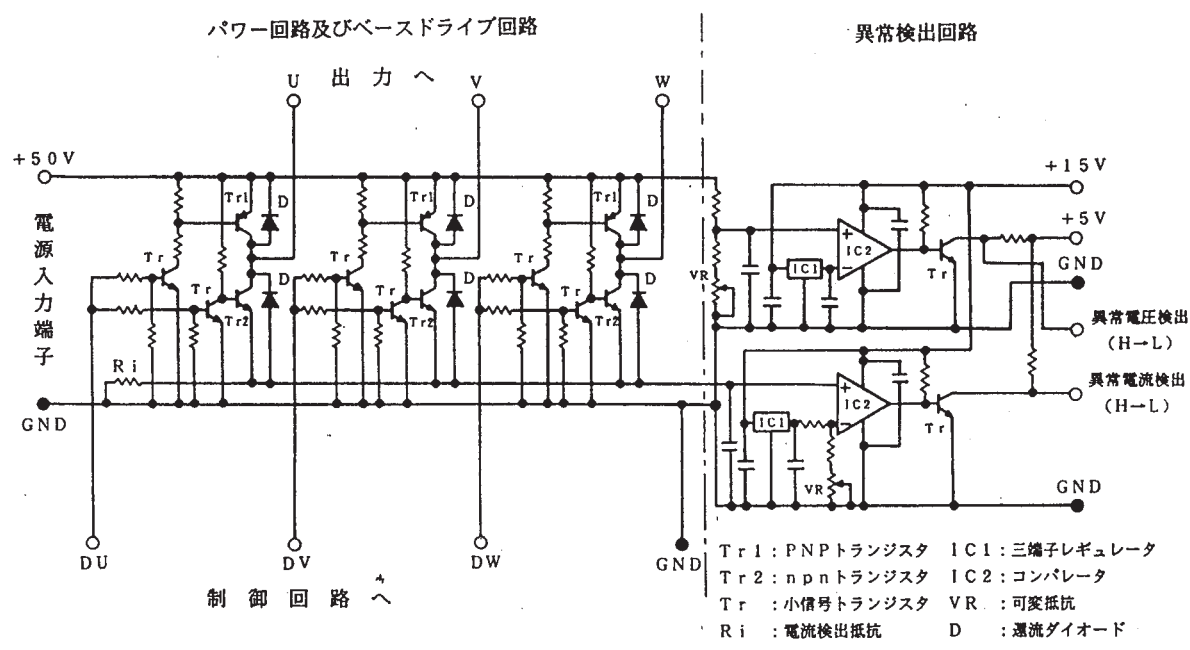


(図) 6. インバータ装置の基本構成

および制御回路への電力供給回路で、パワー回路は負荷モータなどへ電力を供給するインバータ回路であり、その制御は制御回路よりベースドライブ回路を通して行なわれる。また、異常検出回路は動作中のパワー回路で異常が発生したときに、それを検知し制御回路に緊急指令を送る回路である。

基本設計と動作確認

インバータ装置のパワー回路（インバータ部）、ベースドライブ回路、異常電圧検出回路、異常電流検出回路について基本設計を行ない、その回路を図7. に示す。また、設計した回路は実際に試作し、それぞれの回路について動作確認を行なった。その結果、各回路とも設計どおりに動作したがトランジスタのコレクタ電流などに若干の誤差が見られた。これは回路中の素子や抵抗などの単体特性を調べていないためと考えられる。また、装置全体の実験については、P W M制御指令を作り出す制御回路の設計未修得のため行っていない。



(図) 7. 基本設計による試作回路

試作回路の各設計については以下に示す。各素子を決定する際の安全係数については、いずれの場合も2とした。

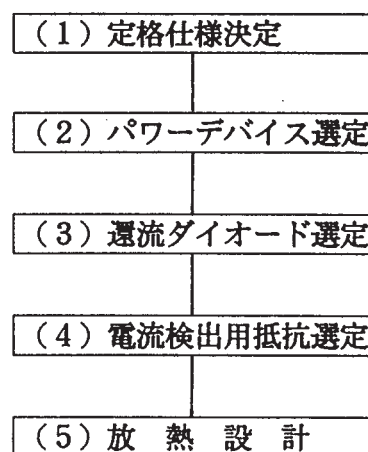
[パワー回路設計]

最近、パワー回路はパワー・モジュール化されたものを利用するが多いが、回路を理解する意味でトランジスタ (T r) を用いて設計する。その方法を図8. に示す。

- (1) 定格仕様は、定格電圧50V、定格電流3A、PWM周波数10KHzとする。
- (2) パワーデバイスにはMOSFET、サイリスタ、パワーTrなどがあるが、安価で理解しやすいパワーTrを使用する。素子は大電流ダーリントン接続の電力スイッチング用で、コンプリメンタリ接続できるPNPとNPN構造の2種類を採用する。
- (3) パワー回路と接続する負荷にモータなどの誘導負荷を用いた場合、回路に遅れ電流が生じる。

還流ダイオードは生じた遅れ電流によるスイッチング時の素子破壊を保護するための素子であり、大電流で逆回復時間の小さい素子を採用する。

- (4) 電流検出用抵抗はパワー回路に影響を与えない極小の抵抗値を採用し、その消費電力は定格電流より計算して決定する。
- (5) 放熱設計は、普通よく知られている方法により熱計算を行ない、パワーTrにヒートシンクを取り付ける。還流流ダイオードはスッチング時間が短いため取り付けない。

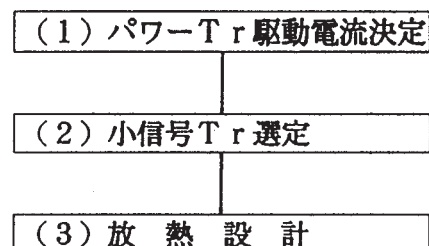


(図) 8. パワー回路設計

### [ベースドライブ回路設計]

ベースドライブ回路は、制御回路においてPWM制御法などで作られる出力信号をパワー回路へ伝達する回路で、すなわちベース電流を流しパワーデバイスを駆動する。ただし、ベースへ通電する方法には $120^\circ$  通電型と $180^\circ$  通電型があり、今回は $180^\circ$  通電型で設計する。また、パワー回路の出力は3相で各相とも同じ構成であるため1相分について設計する。その方法を図9. に示す。

- (1) 制御回路出力はTTL出力が一般に用いられる。  
したがって、小信号でパワー回路を駆動するためのスイッチングのTrが必要となる。先ず、このTrを選定するために、パワーTrを駆動するベース電流を決定する。つぎに、決定された電流値よりパワーTrに係わる各抵抗値とその消費電力を決定する。



(図) 9. ベースドライブ回路設計

- (2) パワー回路にダーリントン接続のパワーTrを使用しているので小信号用Trを採用すればよいが、ベース・コレクタ間およびベース・エミッタ間にはパワー回路定格電圧が印加されるため、耐電圧の高い素子を採用する。つぎに、小信号Trのベース電流を決定し、その電流値より小信号Trに係わる各抵抗値と消費電力を決定する。
- (3) 放熱計算はパワー回路の場合と同じであるが、小信号のためコレクタ損失が小さくヒートシンクは必要としない。

### [異常検出回路設計]

異常電圧と異常電流検出回路の基本構成は同じであり、いずれの場合も検出した電圧・電流を基準電圧と比較し、得られた出力信号を制御回路への割り込み信号として伝達する回路である。また、信号はデジタル様式の電圧信号に変換される。その設計法を図10. に示す。

- (1) 異常検出信号の仕様は、異常電圧の場合はパワー回路定格電圧の $10\%$ 程度で $60V \pm 5\%$ に設定し、異常電流の場合は同じく定格電流より $2 \sim 7A$ に設定する。
- (2) 基準電圧の設定は、常に安定した電圧を得るために三端子レギュレータを使用し、その素子

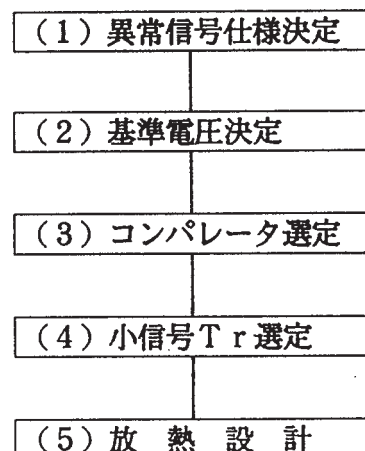


は出力に接続されるコンパレータにほとんど電流が流れないので一般的に用いられる安価なものを採用する。

- (3) 基準電圧と異常信号検出の比較は入力インピーダンスが高いコンパレータを採用し、異常電圧回路はパワー回路電圧を分圧して基準電圧と比較する。また、異常電流検出回路は電流検出抵抗による検出電圧が小さいため基準電圧を分圧して比較する。ここで、入力信号端、三端子レギュレータ入出力およびコンパレータ出力端に接続されているコンデンサーは、いずれも高周波ノイズ除去のためで、その値は経験的に $0.1\mu\text{F}$ 、 $50\text{WV}$ を採用する。

- (4) コンパレータよりの信号が異常なしの場合はHレベル、異常ありの場合はLレベルの出力がデジタル様式で出力される回路のスイッチング用小信号 $T_r$ を採用する。つぎに、採用した $T_r$ のベース電流を決定し係わる各抵抗値と消費電力を決定する。

- (5) 放熱計算は、他の回路と同様に計算し、その結果ヒートシンクは必要としない。



(図) 10. 異常検出回路設計

## あとがき

インバータ装置は開発歴史の浅いこともあり、装置そのものや周辺機器も含めた設置環境など多方面に渡り研究が行なわれている。これらすべてを今回の研修で理解することは困難であるが、装置の基本原理や基本設計およびPWM制御法の基礎について研修できたことは、インバータ装置を理解する上で大変有意義であった。今後は、今回できなかった装置の電源回路部および制御回路部の基本設計を始めとして、装置における振動・ノイズなどの防止策問題や設置環境問題、保守・点検法などについての研修を行ないたい。

最後に試作した回路の動作確認を行なう際に、実験器具提供などの御協力を戴きました工学部電子工学科パワーエレクトロニクス研究室の杉本英彦教授、川崎章司助手に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- |           |                     |        |       |
|-----------|---------------------|--------|-------|
| 常広譲・松本圭二  | : インバータ「しくみと使い方のコツ」 | (1992) | 電気書院  |
| 安川電機製作所 編 | : インバータドライブ技術       | (1990) | 日刊工業  |
| 見城尚志 監修   | : インバータの実用設計        | (1994) | 工業調査会 |
| 山村 昌 監修   | : パワーエレクトロニクス「改訂2版」 | (1991) | オーム社  |
| 大橋伸一・村田良三 | : 実用基礎電子回路          | (1993) | コロナ社  |